



Semnan University



Research Article

Investigating the Effects of Aging on Moisture Damage of Hot Mix Asphalt containing Wetfix Additive and Granite and Limestone Aggregates

Arabani, M.^{a*} , Majd Rahimabadi, M.^b 

^a Professor, Department of Civil Engineering, University of Guilan, Rasht, I. R. Iran.

^b Ph.D. Candidate of Civil Engineering, University of Guilan, Rasht, I. R. Iran.

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2023-10-02

Revised: 2023-10-25

Accepted: 2023-10-29

Keywords:

Asphalt mixture;

Asphalt mixture;

Bitumen aging;

Moisture damage;

Pull-off test;

Wetfix additive.

ABSTRACT

Aging is one of the factors affecting the physical and chemical properties of bitumen. This factor can lead to moisture damage in the asphalt mixture. The objective of this study is to investigate the effect of short- and long-term aging on the moisture damage mechanisms of hot mix asphalt containing Wetfix using the Pull-off method. Two types of bitumen with different performance grades (PG 58-22 and PG 64-16) modified with Wetfix BE additive and two types of aggregates (limestone and granite) were used. First, the rheological properties of bitumen and the physical characteristics of aggregates were determined, and then the chemical composition of aggregates were obtained through an X-ray fluorescence (XRF) test. After modifying the bitumens with Wetfix, the pull-off test was performed to determine the cohesion strength of bitumen and the adhesion strength of bitumen to aggregate on aged and unaged samples in dry and wet conditions. Short-term aging increased the cohesion strength and long-term aging caused a decrease in cohesion strength in wet conditions. Therefore, long-term aging leads to a decrease in bitumen performance in wet conditions and as a result, a decrease in pavement resistance against moisture damage. However, adding Wetfix increased the cohesion strength by 20%-32% and 26%-48% in short- and long-term aging, respectively, and adhesion strength by 43%-26% and 57%-38% in short- and long-term aging, respectively. Comparing the effects of aging of base and modified bitumen on the reduction of adhesion and cohesion strengths shows that addition of Wetfix not only eliminates the negative effects of aging on these parameters, but also improves the resistance of modified bitumen, compared to base bitumen, against moisture damage.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jtie.2023.31971.1652>

* Corresponding author.

E-mail address: arabani@guilan.ac.ir

How to cite this article: Arabani, M., & Majd Rahimabadi, M. (2023). Investigating the Effects of Aging on Moisture Damage of Hot Mix Asphalt containing Wetfix Additive and Granite and Limestone Aggregates. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 9(3), 23-38. doi: [10.22075/jtie.2023.31971.1652](https://doi.org/10.22075/jtie.2023.31971.1652)



Semnan University

مجله زیر ساخت های حمل و نقل

وبسایت نشریه: <https://jtie.semnan.ac.ir/?lang=en>

شاپا: 2821-0549



مقاله پژوهشی

بررسی تاثیر پیرشدگی بر خرابی رطوبتی مخلوط آسفالت گرم حاوی افزودنی و تیفیکس و سنگدانه‌های گرانیتی و آهکی

مهیار عربانی^{۱*}، مریم مجد رحیم آبادی^۲

^۱استاد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه گیلان، رشت
^۲دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشگاه گیلان، رشت

چکیده

پیرشدگی یکی از عوامل مؤثر بر خواص فیزیکی و شیمیایی قیر است. این عامل می‌تواند منجر به بروز خرابی رطوبتی در مخلوط آسفالتی گردد. هدف از این مطالعه، بررسی اثر پیرشدگی کوتاه‌مدت و بلندمدت بر مکانیزم‌های خرابی رطوبتی مخلوط آسفالت گرم حاوی و تیفیکس با استفاده از روش پول آف می‌باشد. از دو نوع قیر با درجه عملکردی مختلف (PG 58-22 و PG 64-16) اصلاح‌شده با افزودنی و تیفیکس BE و همچنین دو نوع سنگدانه (آهکی و گرانیتی) استفاده شد. ابتدا خواص رئولوژیک قیرها و مشخصات فیزیکی سنگدانه‌ها تعیین شد و سپس ترکیبات شیمیایی سنگدانه‌ها از طریق آزمایش فلور سانس اشعه ایکس (XRF) به دست آمد. پس از اصلاح قیر با افزودنی و تیفیکس، آزمایش پول آف برای تعیین مقاومت پیوستگی قیر و مقاومت چسبندگی قیر به سنگدانه روی نمونه‌های پیر شده و پیر نشده، در شرایط خشک و مرطوب، انجام شد. پیرشدگی کوتاه‌مدت منجر به افزایش مقاومت پیوستگی و پیرشدگی بلندمدت سبب کاهش مقاومت پیوستگی در شرایط مرطوب شد. بنابراین، پیرشدگی بلندمدت منجر به کاهش عملکرد قیر در شرایط مرطوب و کاهش مقاومت روسازی در برابر خرابی رطوبتی می‌شود. همچنین، در شرایط مرطوب، پیرشدگی کوتاه‌مدت و بلندمدت مقاومت چسبندگی را کاهش داد که سبب کاهش مقاومت رطوبتی روسازی آسفالتی نیز می‌شود. افزودنی و تیفیکس سبب افزایش مقاومت‌های پیوستگی بین ۲۰-۳۲ درصد و ۲۶-۴۸ درصد به ترتیب در حالت پیرشده کوتاه‌مدت و بلندمدت و همچنین افزایش چسبندگی بین ۲۶-۴۳ درصد و ۳۸-۵۷ درصد به ترتیب در حالت پیرشده کوتاه‌مدت و بلندمدت شد. مقایسه تأثیرات پیرشدگی برای قیر پایه و اصلاح شده بر کاهش مقاومت چسبندگی و پیوستگی، بیانگر آن است که افزودنی و تیفیکس نه تنها اثرات منفی پیرشدگی بر این پارامترها را از بین می‌برد، بلکه مقاومت قیر اصلاح شده را نسبت به قیر پایه در برابر خرابی رطوبتی بهبود می‌بخشد.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۷/۱۰

بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۰۳

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۰۷

واژگان کلیدی:

مخلوط آسفالتی،

پیرشدگی قیر،

خرابی رطوبتی،

آزمایش پول آف،

افزودنی و تیفیکس.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jtie.2023.31971.1652>

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: arabani@guilan.ac.ir

استناد به این مقاله: عربانی، مهیار، & مجد رحیم آبادی، مریم. (۱۴۰۲). بررسی تاثیر پیرشدگی بر خرابی رطوبتی مخلوط آسفالت گرم حاوی افزودنی و تیفیکس و سنگدانه‌های گرانیتی و آهکی. مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل، ۹(۳)، ۲۳-۳۸. doi: 10.22075/jtie.2023.31971.1652

۱. مقدمه

روش‌های مختلفی برای ارزیابی خرابی رطوبتی و بهبود پیوند بین قیر و سنگدانه‌ها وجود دارد. در مطالعه حاضر، برای ارزیابی تأثیر پیرشدگی قیر و مواد افزودنی بر خرابی رطوبتی از آزمایش مقاومت کششی مستقیم به روش پول آف^۱ استفاده شد که روشی ساده، سریع و قابل اعتماد است و به طور مستقیم روی قیر و سنگدانه در شرایط مختلف رطوبتی انجام می‌شود. این آزمایش، برای بررسی مقاومت قیر و نوع گسیختگی قیر و سنگدانه استفاده می‌شود. تحقیقات مختلفی در مورد اثرات پیرشدگی و افزودنی‌های مختلف بر خرابی رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از روش پول آف انجام شده است که در ادامه، مطالعات مربوطه بررسی شده است. در مطالعه‌ای، چسبندگی قیرها و سنگدانه‌های مختلف با روش پول آف مورد بررسی قرار گرفت. در شرایط مرطوب، مقاومت چسبندگی کاهش یافت. در نمونه‌های حاوی قیر پیرنشده، گسیختگی پیوستگی و در نمونه‌های پیرشده، گسیختگی چسبندگی رخ داد (آصف و همکاران، ۲۰۱۸). نتایج مطالعه آگویار مویا و همکاران (۲۰۱۵) نشان داد که پیرشدگی، به ویژه پیرشدگی کوتاه‌مدت، مقاومت چسبندگی را افزایش می‌دهد. نوع قیر و منبع سنگدانه بر مقاومت نمونه‌ها تأثیرگذار بود. در پژوهش جمیل و همکاران (۲۰۲۲)، در اثر پیرشدگی کوتاه و بلندمدت، مقاومت کششی پول آف افزایش یافت. در شرایط خشک، گسیختگی پیوستگی در قیرهای پایه و پیرشده کوتاه‌مدت و گسیختگی چسبندگی در قیرهای پیرشده بلندمدت رخ داد. اما، در شرایط مرطوب، گسیختگی پیوستگی در تمام حالات رخ داد. در مطالعه‌ای، با بررسی تأثیر دو نوع افزودنی و پیرشدگی، مشخص گردید که پیرشدگی منجر به بهبود مقاومت پیوستگی و کاهش مقاومت چسبندگی بین قیر و سنگدانه می‌شود. پیرشدگی کوتاه‌مدت منجر به افزایش مقاومت پیوستگی قیر و پیرشدگی بلندمدت منجر به کاهش

عوامل محیطی مانند پیرشدگی و انتقال رطوبت در لایه‌های روسازی انعطاف‌پذیر عمدتاً بر دوام مخلوط آسفالتی تأثیر می‌گذارند. سخت شدن شیمیایی قیر در اثر اکسید شدن ترکیبات آلی و از بین رفتن مواد فرار در طول زمان به عنوان اکسیداسیون یا پیرشدگی قیر شناخته می‌شود که بر رفتار مکانیکی قیر تأثیر می‌گذارد (نیکولایدس، ۲۰۱۴؛ عربانی و مجد رحیم‌آبادی، ۲۰۲۳). پیرشدگی از دو مرحله کوتاه‌مدت و بلندمدت تشکیل شده است. پیرشدگی کوتاه‌مدت در هنگام تولید، اختلاط، حمل و نقل و پخش رخ می‌دهد که ناشی از تبخیر بخش‌های سبک‌تر قیر (هیدروکربن‌ها) در دماهای زیاد است. پیرشدگی بلندمدت شامل سخت شدن و اکسیداسیون است که در طول عمر مفید روسازی به دلیل واکنش شیمیایی هیدروکربن‌های قیر با اکسیژن و عوامل محیطی از جمله دما، اکسیژن، اشعه فرابنفش و رطوبت رخ می‌دهد (لویز مونتر و همکاران، ۲۰۱۸؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۲۰). پیرشدگی و تغییر خواص فیزیکی-شیمیایی قیر منجر به سفت شدن قیر و در نتیجه ایجاد ترک و عریان شدگی در روسازی می‌شود. در مخلوط‌های آسفالتی، خرابی رطوبتی به عنوان از دست دادن سختی و مقاومت در اثر قرار گرفتن در معرض رطوبت و بارگذاری مکانیکی تعریف می‌شود (علی و همکاران، ۲۰۲۲). این خرابی به دو صورت گسیختگی چسبندگی و گسیختگی پیوستگی رخ می‌دهد. به از بین رفتن چسبندگی سنگدانه-قیر گسیختگی چسبندگی و از بین رفتن پیوستگی قیر گسیختگی پیوستگی گویند. اجزای اصلی مخلوط‌های آسفالتی قیر و سنگدانه‌ها هستند. بنابراین، بهبود خواص مخلوط با استفاده از سنگدانه‌های با کیفیت و قیرهای اصلاح‌شده، عملکرد مخلوط را افزایش داده و از بروز آسیب می‌کاهد (عربانی و بلوچ سیرگانی، ۲۰۲۱).

^۱ Pull-off

داد. نتایج نشان داد که افزودنی‌ها منجر به افزایش مقاومت در شرایط خشک و مرطوب می‌شوند. نمونه‌های تهیه شده با سنگدانه آهکی مقادیر مقاومت بیشتری داشتند. مطالعه آکسوی و همکاران (۲۰۰۵) ویژگی‌های مکانیکی مخلوط‌های حاوی قیر ۶۰-۷۰ اصلاح‌شده با افزودنی و تیفیکس را با آزمایش‌های مارشال، کشش غیرمستقیم و لاتمن اصلاح‌شده ارزیابی نمود. افزودنی مورد استفاده در این مطالعه، سطح خرابی ناشی از رطوبت در مخلوط‌های آسفالتی را کاهش داد. نتایج مطالعه انجام شده برای ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی حاوی دو نوع قیر ۶۰-۷۰ و ۸۵-۱۰۰ اصلاح‌شده با افزودنی و تیفیکس و سه نوع سنگدانه (سنگ آهک، گرانیت و کوارتزیت) نشان داد که استفاده از افزودنی باعث به تأخیر افتادن وقوع عریان‌شدگی و بهبود مقاومت در برابر رطوبت مخلوط‌های آسفالتی شد (اسماعیلی و همکاران، ۲۰۱۹). پیرشدگی یکی از عوامل اصلی بروز خرابی در روسازی‌های آسفالتی می‌باشد که در شرایط مرطوب منجر به تشدید خرابی رطوبتی نیز می‌گردد. بنابراین، شناخت تأثیر پیرشدگی بر مکانیزم‌های خرابی رطوبتی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از طرف دیگر، برخی از افزودنی‌ها می‌توانند نقش مؤثری در جلوگیری از کاهش اثرات منفی پیرشدگی ایفا نمایند. اکثر آزمایش‌های کمی یا کیفی موجود برای تعیین خرابی رطوبتی، بر مقاومت کلی و دوام مخلوط آسفالتی تأکید می‌کنند و دو پارامتر مؤثر بر دوام مخلوط آسفالتی (پیوستگی قیر و چسبندگی قیر به سنگدانه) را به طور دقیق بررسی نمی‌کنند. هدف از پژوهش حاضر، بررسی اثر پیرشدگی بر مکانیزم‌های خرابی رطوبتی از طریق سنجش معیارهای گسیختگی پیوستگی و گسیختگی چسبندگی می‌باشد. بدین منظور، ابتدا هر دو نوع قیر با افزودنی و تیفیکس اصلاح شدند و سپس قیرهای پایه و اصلاح‌شده تحت پیرشدگی کوتاه-مدت و بلندمدت قرار گرفتند. پس از آن، آزمایش پول آف روی نمونه‌های قیری و سنگدانه‌های آهکی و گرانیتی

مقاومت پیوستگی در شرایط مرطوب شد. همچنین، استفاده از هر دو افزودنی منجر به بهبود مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر خرابی رطوبتی شد (عربانی و همکاران، ۲۰۲۳). نتایج مطالعه شیائو و هوانگ (۲۰۲۲) نشان داد که هم پیرشدگی کوتاه‌مدت و هم پیرشدگی بلندمدت به طور قابل توجهی خواص مخلوط آسفالتی را مختل می‌کنند و پتانسیل جداشدگی در سطح تماس قیر-سنگدانه را به علت کاهش پوشش‌پذیری افزایش می‌دهند. مخلوط‌های آسفالتی پس از پیرشدگی کوتاه‌مدت مقاومت بیشتری در برابر رطوبت نشان دادند، اگرچه دچار خرابی شدند.

مطالعات مختلفی به بررسی تأثیر افزودنی و تیفیکس بر خرابی‌های مختلف روسازی، از جمله خرابی رطوبتی، پرداخته‌اند. در مطالعه‌ای، اثر افزودنی و تیفیکس بر خرابی رطوبتی و شیارشدگی بررسی شد. استفاده از افزودنی و تیفیکس منجر به بهبود قابل توجه حساسیت رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی حاوی سنگدانه‌های سیلیسی شد. در این مطالعه، میزان بهینه افزودنی ۰/۵ درصد بود که منجر به بیشترین بهبود در حساسیت رطوبتی، مدول ارتجاعی و مقاومت در برابر شیارشدگی شد (ایمانی نسب و جودکی، ۲۰۱۹). در پژوهش المرو و مولنهور (۲۰۲۱)، اثر افزودنی و تیفیکس بر نمونه‌های حاوی سه نوع سنگدانه، با استفاده از چند روش مختلف از جمله روش پول آف، بررسی شد. طبق نتایج، ترکیبات معدنی سنگدانه‌ها و افزودنی و تیفیکس نقش مؤثری در بهبود عملکرد مخلوط در برابر حساسیت رطوبتی و بهبود عملکرد طولانی‌مدت سنگدانه نقش مؤثری داشتند. نتایج مطالعات ناتادماجا و همکاران (۲۰۱۹ و ۲۰۲۰) نشان داد که استفاده از افزودنی و تیفیکس منجر به افزایش پایداری و مقاومت در برابر خرابی رطوبتی مخلوط آسفالتی شد. حامدی (۲۰۱۷) اثر دو نوع افزودنی و تیفیکس بر حساسیت رطوبتی نمونه‌های حاوی سه نوع سنگدانه (سنگ آهک، گرانیت و کوارتزیت) را مورد بررسی قرار

است. مشخصات فیزیکی سنگدانه‌ها در جدول ۱، اجزای سنگدانه‌ها که با استفاده از روش فلورسانس اشعه ایکس (XRF) تعیین شده در شکل ۱ و همچنین مشخصات قیرها در جدول ۲ نشان داده شده است. و تیفیکس BE یک افزودنی تجاری ضدعریان‌شدگی مایع متشکل از آلکیل و آلکیل آمین‌ها است که با ایجاد پایداری حرارتی موجب بهبود خاصیت چسبندگی بین قیر و سنگدانه می‌شود. همچنین، به ایجاد پیوند شیمیایی بین قیر و سنگدانه کمک می‌کند. مشخصات این افزودنی در جدول ۳ ارائه شده است.

در شرایط خشک و مرطوب انجام شد. همچنین، نتایج آزمایش پول آف با استفاده از تحلیل آماری مورد بررسی قرار گرفت.

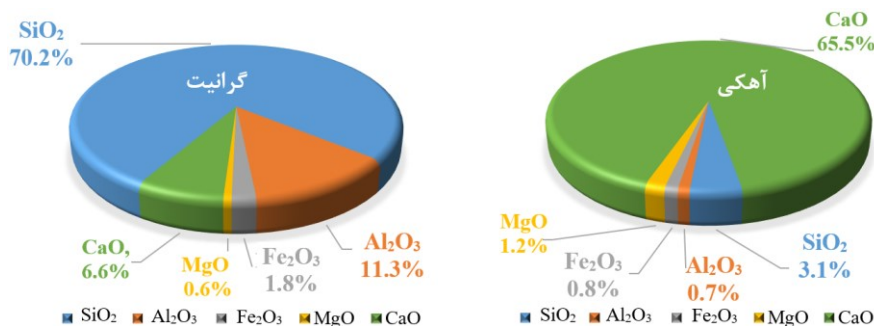
۲. مصالح و روش‌ها

۲-۱. مصالح

در این مطالعه، از سنگدانه‌های آهکی و گرانیتی با حساسیت رطوبتی مختلف و دو نوع قیر PG 64-16 و PG 58-22 با درجه عملکردی متفاوت استفاده شده

جدول ۱. مشخصات فیزیکی سنگدانه‌ها

| مقادیر آزمایشگاهی | | استاندارد | خصوصیات |
|-------------------|--------------|----------------------|-----------------------------|
| سنگدانه گرانیتی | سنگدانه آهکی | | |
| <u>درشت‌دانه</u> | | | |
| ۲/۶۱ | ۲/۵۹ | | وزن مخصوص |
| ۲/۶۳ | ۲/۶۰ | ASTM C127 | وزن مخصوص مؤثر |
| ۲/۶۵ | ۲/۶۲ | | وزن مخصوص ظاهری |
| <u>ریزدانه</u> | | | |
| ۲/۶۰ | ۲/۵۷ | | وزن مخصوص |
| ۲/۶۲ | ۲/۵۸ | ASTM C128 | وزن مخصوص مؤثر |
| ۲/۶۵ | ۲/۶۱ | | وزن مخصوص ظاهری |
| ۲/۵۵ | ۲/۵۶ | ASTM D854 | وزن مخصوص فیلر |
| ۱۹ | ۲۷ | ASTM C131 | سایش لس آنجلس (%) |
| ۴ | ۲ | ASTM C88 | افت وزنی با سولفات سدیم (%) |
| ۹ | ۳ | ASTM D4791 | سنگدانه‌های صاف و کشیده (%) |
| ۱/۲ | ۰/۸ | ASTM C127, ASTM C128 | جذب آب (%) |



شکل ۱. ترکیبات شیمیایی سنگدانه‌ها به دست آمده از آزمایش XRF

جدول ۲. مشخصات رئولوژیک قیرها

| PG 58-22 | PG 64-16 | استاندارد | مشخصات | روش آزمایش |
|----------|----------|-------------|---|--|
| ۲۹۵ | ۳۰۴ | ASTM D92 | ۲۳۰ °C | نقطه اشتعال (°C) |
| ۰/۳۲ | ۰/۳۳ | ASTM D4402 | حد اکثر ۳ Pa.s، ۱۳۵ °C | ویسکوزیته چرخشی (Pa.sec) |
| G*/sinδ | | AASHTO T315 | حداقل ۱ kPa در دمای ۵۸ °C و ۶۴ °C | رئومتر برشی دینامیک (kPa)، پیرنشده |
| ۳/۱ | ۱/۷۸ | AASHTO T315 | حداقل ۲/۲ kPa در دمای ۵۸ °C و ۶۴ °C | رئومتر برشی دینامیک (kPa)، پیرشده به روش RTFO |
| G*/sinδ | | AASHTO T315 | حد اکثر ۵۰۰۰ MPa در دمای ۲۵ °C و ۲۲ °C | رئومتر برشی دینامیک (kPa)، پیرشده به روش PAV |
| ۲۶۵۰ | ۲۶۵۰ | AASHTO T315 | حد اکثر ۳۰۰ MPa در دمای ۶ °C و ۱۲ °C | رئومتر تیر خمشی (MPa) |
| سختی | | AASHTO T313 | حد اکثر ۰/۳ | |
| ۱۰۹ | ۱۰۱ | AASHTO T313 | | |
| m-value | | | | |
| ۰/۳۲۱ | ۰/۳۴۱ | | | |

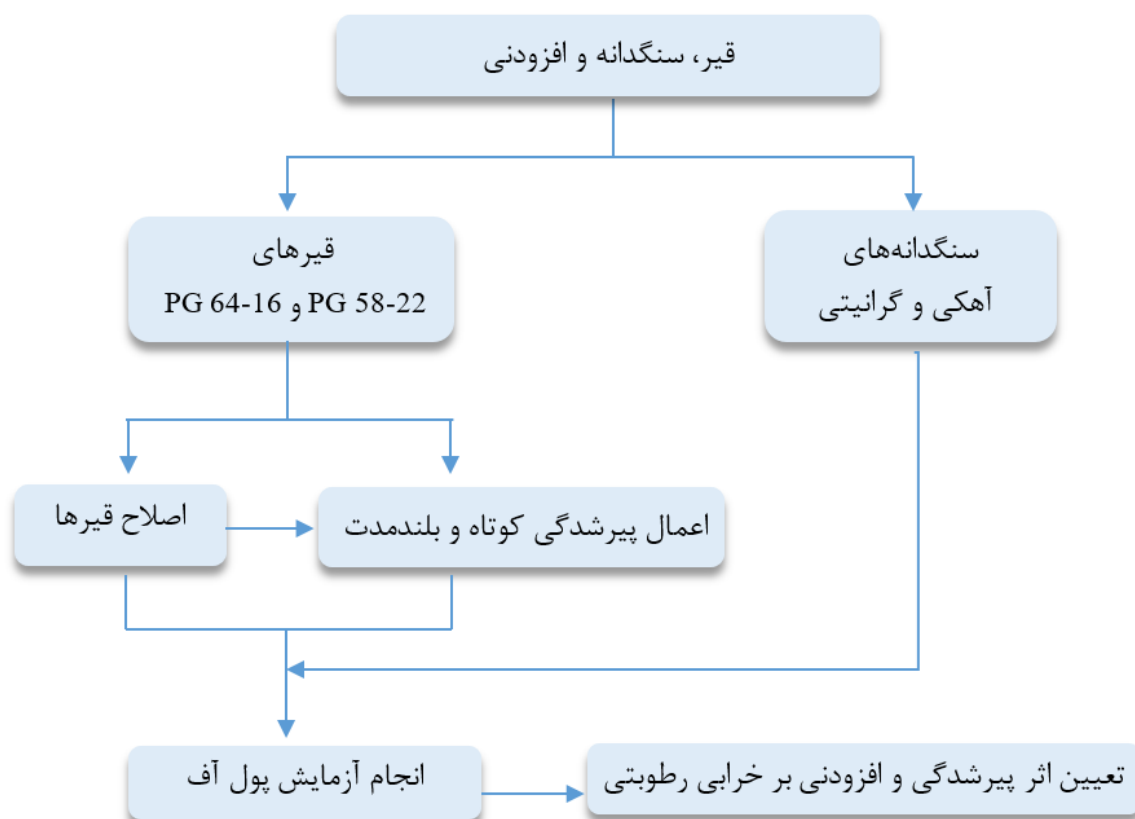
جدول ۳. مشخصات افزودنی و تفیکس BE

| مابع | شکل ظاهری |
|---------|-----------------------------|
| قهوه‌ای | رنگ |
| ۹/۶۱ | چگالی (gr/cm ³) |
| ۲۱۸ < | نقطه اشتعال (°C) |
| ۸۰۰ | ویسکوزیته (20 °C) (mPa.s) |
| ۱۰ ≥ | مقدار اسید (mg KOH/g) |
| ۱۶۰-۱۸۵ | تعداد کل آمین (HCl/gr) |

۲-۲. روش آزمایش

در نهایت، تأثیر پیرشدگی و ماده افزودنی بر خرابی رطوبتی نمونه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. مراحل انجام پژوهش در شکل ۲ نشان داده شده است.

برای بررسی خرابی رطوبتی، پس از اصلاح قیر و اعمال پیرشدگی، نمونه‌ها تحت آزمایش پول آف قرار گرفتند.



شکل ۲. مراحل انجام پژوهش

برش بالا^۱ با سرعت ۹۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۵ دقیقه با وتفیکس ترکیب و اصلاح شد. سرعت و زمان اختلاط (از جمله قیر کنترل) ثابت نگه داشته شد تا از تأثیر پیرشدگی در هنگام اختلاط جلوگیری شود. نمونه‌ای از افزودنی وتفیکس در شکل ۳ نشان داده شده است.

۲-۳. اصلاح قیر

برای اصلاح قیرهای مختلف با افزودنی وتفیکس، ابتدا هر یک از قیرها تا دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس حرارت داده شدند تا به مایع تبدیل شوند. هر قیر در یک میکسر



شکل ۳. افزودنی وتفیکس

^۱ - High shear

۲-۴. اعمال پیرشدگی قیر

قیرهای PG 58-22 و PG 64-16 با استفاده از روش لعاب نازک چرخشی و طبق AASHTO T240 (۲۰۱۳) تحت پیرشدگی کوتاه مدت و سپس با استفاده از روش محفظه تسریع پیرشدگی مطابق AASHTO R28 (۲۰۰۹) تحت پیرشدگی بلندمدت قرار گرفتند.

برای اعمال پیرشدگی کوتاه مدت، قیرها در ظرفی با ابعاد مشخص ریخته شدند و در گرمخانه‌ای با دمای ۱۶۳ درجه سلسیوس به مدت ۸۵ دقیقه قرار گرفتند. همچنین، پیرشدگی بلندمدت با قرار دادن نمونه‌های قیری در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس، به مدت ۲۰ ساعت و تحت فشار ۲۰۷۰ کیلو پاسکال، اعمال شد.

۲-۵. آزمایش پول آف

آزمایش کشش مستقیم برای ارزیابی مکانیسم‌های مختلف گسیختگی در مخلوط‌های آسفالتی در دو شرایط خشک و مرطوب انجام شد. این آزمایش، مقاومت کششی قیر متصل به صفحه سنگی را ارزیابی می‌کند و از طریق بررسی سطح گسیختگی نوع خرابی تعیین می‌شود. در این آزمایش، خرابی در لایه قیر (گسیختگی پیوستگی)، در سطح تماس قیر و سنگدانه (گسیختگی چسبندگی) و یا هر دو حالت رخ می‌دهد.

این آزمایش مطابق استاندارد AASHTO T 361 (۲۰۱۶) انجام شد. برای این منظور، سنگدانه‌ها با

ضخامت یکنواخت و سطح صاف و موازی برش داده شدند. سپس برای ایجاد زبری یکنواخت، سطح سنگدانه‌ها صیقل داده شدند. پس از آن در حمام اولتراسونیک به مدت یک ساعت قرار گرفتند. سطح سنگدانه‌ها با استون شسته و در کوره حرارت داده شدند تا آب جذب شده خارج شود و چسبندگی بهتری بین قیر و سنگدانه ایجاد شود. همچنین، برای شبیه‌سازی شرایط مرطوب نمونه‌های پایه، اصلاح شده و پیر شده به مدت یک ساعت در آب با دمای ۶۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند. سپس، یک نمونه قیری روی یک قطعه سنگدانه قرار گرفت و نمونه تحت بارگذاری با نرخ ۰/۶۹ مگاپاسکال بر ثانیه قرار گرفت. زمانی که تنش وارده از مقاومت قیر فراتر رفت گسیختگی رخ داد. حداکثر نیروی منجر به شکست ثبت شد و با رابطه (۱) مقاومت کششی پول آف نمونه‌ها محاسبه شد.

$$POTS = \frac{(BP * A_G) - C}{A_{PS}} \quad (1)$$

که در آن، BP فشار در لحظه گسیختگی (kPa)، A_G ناحیه تماس پیستون با صفحه (mm²)، A_{PS} محیط استاب (mm²) و C ثابت پیستون است.

برای دستیابی به گسیختگی پیوستگی، ضخامت قیر پخش شده روی سطح سنگدانه‌ها ۲ میلی‌متر و برای گسیختگی چسبندگی این ضخامت حدود ۱ میلی‌متر در نظر گرفته شد. نمونه‌ها و تجهیزات آزمایش پول آف در شکل ۴ نشان داده شده است.





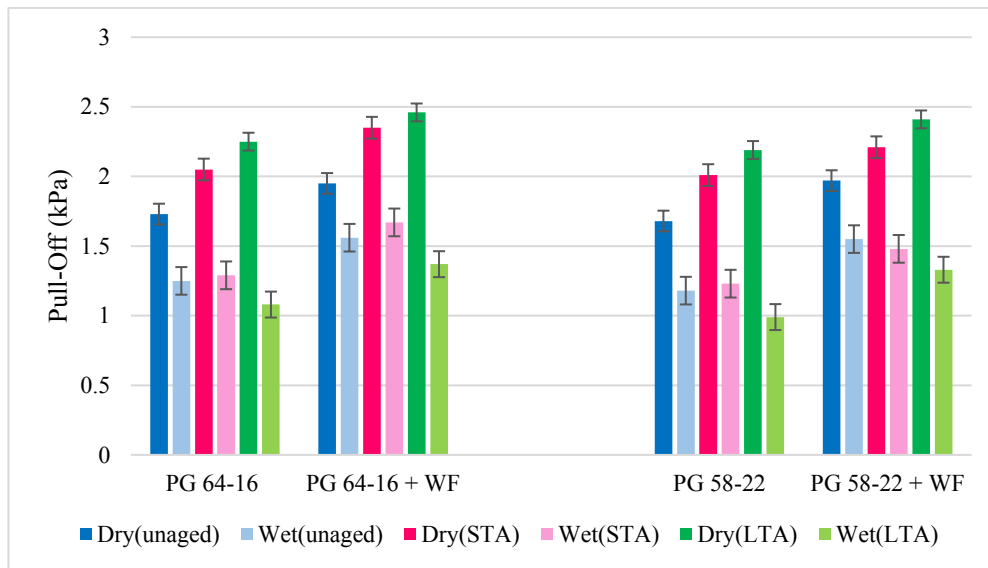
شکل ۴. نمونه‌ها و تجهیزات آزمایش پول آف

مختلف کنترل و پیرشده را ارتقا داد. همچنین، افزودنی و تیفیکس در نمونه‌های حاوی قیر PG 58-22 نتیجه بهتری داشت. افزودنی و تیفیکس هر دو خاصیت آبریزی (غیر قطبی) یا آب دوستی (قطبی) را در مولکول‌های خود داراست. استفاده از این افزودنی، با تغییر قطبیت سطح قیر، منجر به ایجاد چسبندگی خوب با سنگدانه‌هایی که چسبندگی ضعیفی با قیر دارند می‌شود و همچنین به ایجاد پیوند شیمیایی بین قیر و سنگدانه کمک می‌کند. با مقایسه نمودارهای شکل‌های ۵ و ۶ می‌توان دریافت که بر خلاف مقاومت چسبندگی، مقاومت پیوستگی در نمونه‌های حاوی سنگدانه‌های آهکی و گرانیتی تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند. علت این امر این است که مقاومت پیوستگی به شدت به نوع قیر و پیوستگی آن بستگی دارد و نوع سنگدانه تأثیر چندانی بر این پارامتر ندارد. دلیل اصلی این موضوع را می‌توان ضخامت بیشتر غشای قیر نسبت به حالت گسیختگی چسبندگی دانست. ضخامت زیاد غشای قیر در این آزمایش باعث می‌شود تا گسیختگی در سطح تماس قیر-سنگدانه رخ ندهد و در غشای قیر به وقوع بپیوندد. این عامل باعث می‌شود تا خصوصیات قیر تأثیر چشمگیرتری نسبت به نوع سنگدانه داشته باشد.

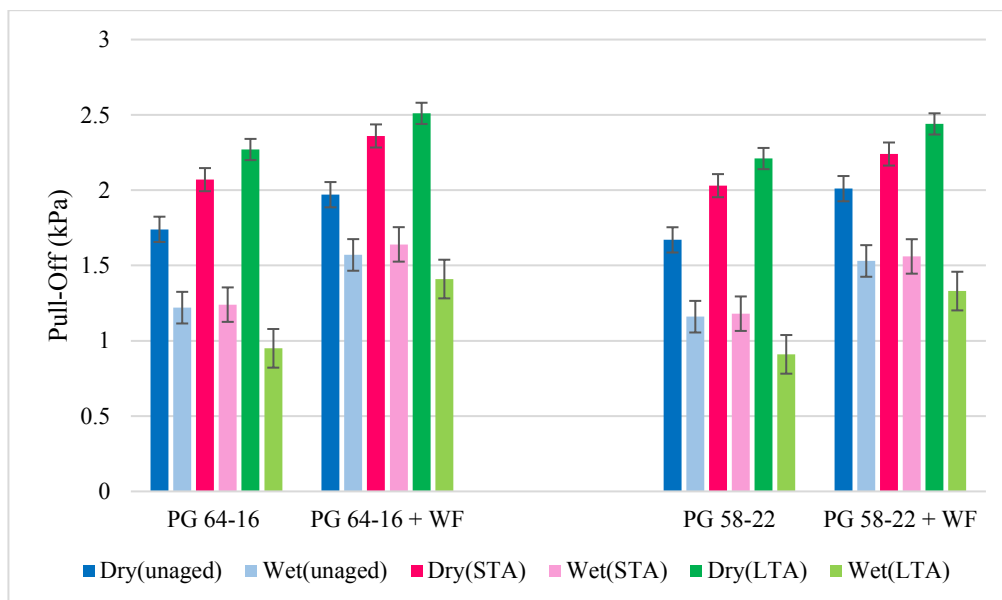
۳. نتایج و بحث

آزمایش پول آف در حالت‌های گسیختگی چسبندگی (بین قیر-سنگدانه) و گسیختگی پیوستگی (در لایه قیری) با ضخامت قیر ۱ و ۲ میلی‌متر انجام شد. نتایج مقاومت پیوستگی پول آف در شکل‌های ۴ و ۵ آورده شده است. مقاومت پیوستگی به طور قابل توجهی به نوع و ضخامت قیر و مقاومت چسبندگی به هر دو عامل قیر و سنگدانه وابسته است. در این آزمایش، اثر قیر بر مقاومت پیوستگی به طور قابل توجهی بیشتر از نوع سنگدانه است.

پیرشدگی منجر به افزایش مقاومت پیوستگی نمونه‌های خشک شد. در حالت پیرشده بلندمدت، مقدار مقاومت پیوستگی نسبت به حالت پیرشده کوتاه‌مدت افزایش بیشتری داشت. علت این امر تبخیر بخش‌های فرار قیر و افزایش مقدار آسفالتن می‌باشد که سبب قوی‌تر شدن قیر و در نتیجه افزایش مقاومت پیوستگی می‌شود. هنگامی که نمونه‌ها تحت شرایط مرطوب قرار گرفتند، مقاومت پیوستگی پول آف به طور قابل توجهی کاهش یافت. این امر تأیید می‌کند که وجود آب می‌تواند حساسیت رطوبتی و احتمال عریان‌شدگی را افزایش دهد. افزودنی و تیفیکس مقاومت پیوستگی همه ترکیبات



شکل ۵. مقاومت پیوستگی پول آف برای سنگدانه‌های آهکی



شکل ۶. مقاومت پیوستگی پول آف برای سنگدانه‌های گرانیتی

نمونه‌های حاوی قیر PG64-16 و قیر PG58-22 اصلاح شده درج شده است. همانگونه که از این جداول مشاهده می‌شود، مقادیر p کمتر از ۰/۰۵ است که نشان‌دهنده اختلاف معنادار میانگین‌ها در سطح اطمینان ۹۵ درصد است. مقادیر p -value نشان می‌دهد که پیرشدگی بر مقاومت پیوستگی تأثیرگذار است.

آزمون t برای بررسی اثر پیرشدگی بر مقاومت پیوستگی انجام شد. بدین منظور، بررسی آماری بین نتایج آزمایش پول آف قیرهای پیرنشده با نتایج آزمایش قیرهای پیرشده (کوتاه مدت و بلندمدت) در حالت خشک و مرطوب به طور مجزا انجام شد و مقادیر t و P تعیین گردید. در جداول ۴ و ۵، نتایج آزمون t به ترتیب برای بررسی تأثیر پیرشدگی بر مقاومت پیوستگی

تأثیر پیرشدگی بر خرابی رطوبتی مخلوط آسفالت گرم حاوی افزودنی و تفتیکس و سنگدانه‌های گرانیتی و آهکی

جدول ۴. نتایج آزمون t برای بررسی تأثیر پیرشدگی بر مقاومت پیوستگی نمونه‌های حاوی قیر PG64-16 اصلاح شده

| قیر PG64-16 اصلاح شده + سنگدانه آهکی | | | | | | |
|---|------|---------|---------|---|-------|-------------------|
| Std. Dev. | Mean | P-Value | T | N | وضعیت | حالت بررسی |
| ۰/۰۲۶۴۶ | ۱/۹۵ | ۰/۰۰۲ | -۲۳/۰۹۴ | ۳ | خشک | پیر نشده با |
| ۰/۰۱۰۰۰ | ۲/۳۵ | | | ۳ | | |
| ۰/۰۱۷۳۲ | ۱/۵۶ | ۰/۰۱۹ | -۷/۲۰۱ | ۳ | مرطوب | پیر شده کوتاه مدت |
| ۰/۰۱۰۰۰ | ۱/۶۷ | | | ۳ | | |
| ۰/۰۲۶۴۶ | ۱/۹۵ | ۰/۰۰۰ | -۸۸/۳۳۵ | ۳ | خشک | پیر نشده با |
| ۰/۰۲۰۰۰ | ۲/۴۶ | | | ۳ | | |
| ۰/۰۱۷۳۲ | ۱/۵۶ | ۰/۰۰۶ | ۱۲/۴۳۸ | ۳ | مرطوب | پیر شده بلند مدت |
| ۰/۰۲۶۴۶ | ۱/۳۷ | | | ۳ | | |
| قیر PG64-16 اصلاح شده + سنگدانه گرانیتی | | | | | | |
| ۰/۰۱۰۰۰ | ۱/۹۷ | ۰/۰۰۰ | -۶۷/۵۵۰ | ۳ | خشک | پیر نشده با |
| ۰/۰۱۷۳۲ | ۲/۳۶ | | | ۳ | | |
| ۰/۰۱۰۰۰ | ۱/۵۷ | ۰/۰۲۶ | -۶/۰۶۲ | ۳ | مرطوب | پیر شده کوتاه مدت |
| ۰/۰۱۰۰۰ | ۱/۶۴ | | | ۳ | | |
| ۰/۰۱۰۰۰ | ۱/۹۷ | ۰/۰۰۰ | -۴۶/۷۶۵ | ۳ | خشک | پیر نشده با |
| ۰/۰۱۷۳۲ | ۲/۵۱ | | | ۳ | | |
| ۰/۰۱۰۰۰ | ۱/۵۷ | ۰/۰۰۴ | ۱۶/۰۰۰ | ۳ | مرطوب | پیر شده بلند مدت |
| ۰/۰۱۰۰۰ | ۱/۴۱ | | | ۳ | | |

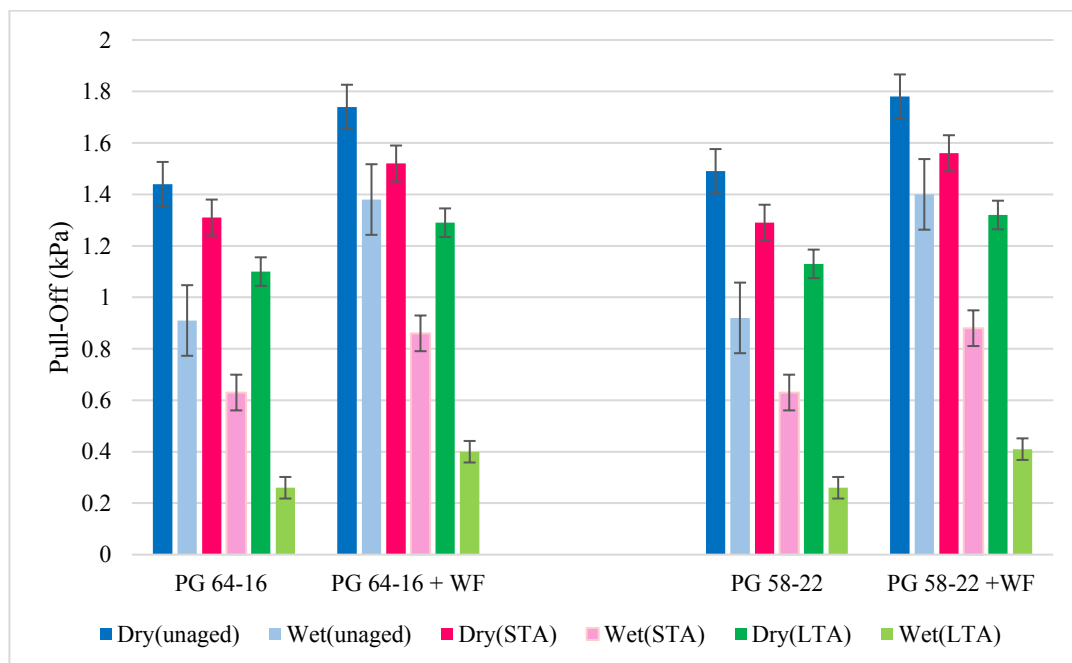
جدول ۵. نتایج آزمون t برای بررسی تأثیر پیرشدگی بر مقاومت پیوستگی نمونه‌های حاوی قیر PG58-22 اصلاح شده

| قیر PG58-22 اصلاح شده + سنگدانه آهکی | | | | | | |
|--------------------------------------|------|---------|---------|---|-------|-------------------|
| Std. Dev. | Mean | P-Value | t | N | وضعیت | حالت بررسی |
| ۰/۰۱۷۳۲ | ۱/۹۷ | ۰/۰۰۱ | -۴۱/۵۶۹ | ۳ | خشک | پیر نشده با |
| ۰/۰۱۰۰۰ | ۲/۲۱ | | | ۳ | | |
| ۰/۰۱۰۰۰ | ۱/۵۵ | ۰/۰۰۷ | ۱۲/۱۲۴ | ۳ | مرطوب | پیر شده کوتاه مدت |
| ۰/۰۱۰۰۰ | ۱/۴۸ | | | ۳ | | |
| ۰/۰۱۷۳۲ | ۱/۹۷ | ۰/۰۰۰ | -۷۶/۲۱۰ | ۳ | خشک | پیر نشده با |
| ۰/۰۲۶۴۶ | ۲/۴۱ | | | ۳ | | |
| ۰/۰۱۰۰۰ | ۱/۵۵ | ۰/۰۰۲ | ۲۲/۰۰۰ | ۳ | مرطوب | پیر شده بلند مدت |
| ۰/۰۲۶۴۶ | ۱/۳۳ | | | ۳ | | |

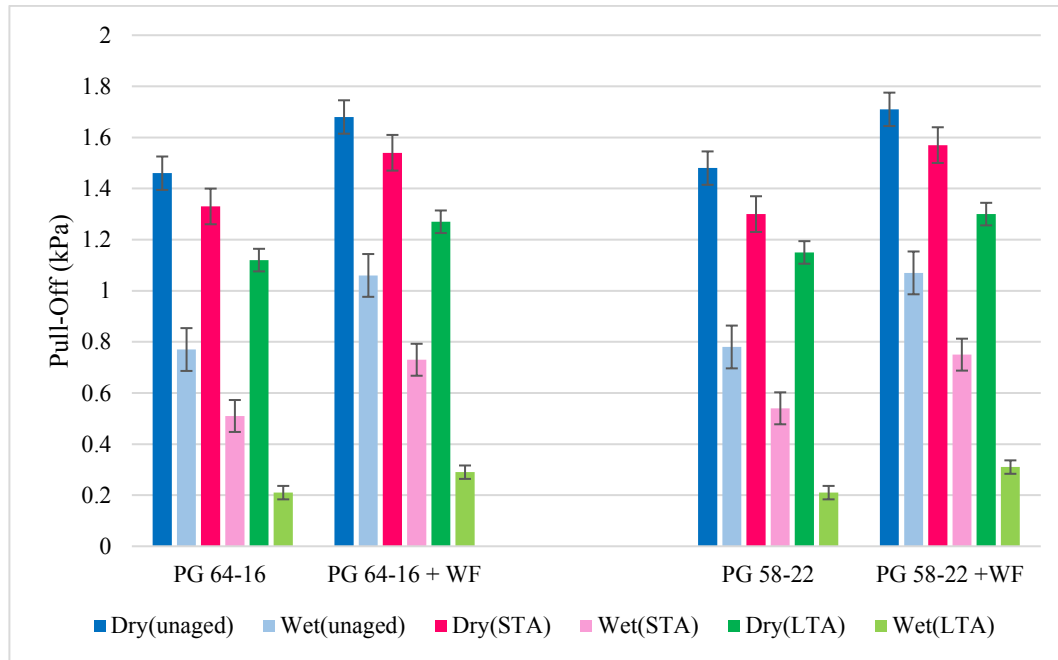
| قیر PG58-22 اصلاح‌شده + سنگدانه گرانیتی | | | | | |
|---|------|-------|---------|---|------------------|
| ۰/۰۲۰۰۰ | ۲/۰۱ | | | ۳ | خشک |
| ۰/۰۰۰۰ | ۲/۲۴ | ۰/۰۰۳ | -۱۹/۹۱۹ | ۳ | پیرنشده با |
| ۰/۰۱۷۳۲ | ۱/۵۳ | | | ۳ | پیرشده کوتاه‌مدت |
| ۰/۰۱۰۰۰ | ۱/۵۶ | ۰/۰۳۵ | -۵/۱۹۶ | ۳ | مرطوب |
| ۰/۰۲۰۰۰ | ۲/۰۱ | | | ۳ | خشک |
| ۰/۰۱۰۰۰ | ۲/۴۴ | ۰/۰۰۱ | -۲۸/۱۵۰ | ۳ | پیرنشده با |
| ۰/۰۱۷۳۲ | ۱/۵۳ | | | ۳ | پیرشده بلندمدت |
| ۰/۰۱۰۰۰ | ۱/۳۳ | ۰/۰۰۳ | ۱۷/۳۲۱ | ۳ | مرطوب |

آن بیشتر از ترکیبات حاوی قیر PG 64-16 بود. طبق مطالعه قبلی، قیر PG 58-22 دارای مؤلفه قطبی زیاد (آسفالتین‌ها و رزین‌های بیشتر) و مؤلفه غیرقطبی (آروماتیک و اشباع) کمتری نسبت به قیر PG 64-16 می‌باشد (عربانی و مجد رحیم‌آبادی، ۲۰۲۳). بنابراین، به علت مؤلفه قطبی بیشتر و مؤلفه غیرقطبی کمتر، پیوند قوی‌تری بین این قیر با سنگدانه‌ها ایجاد شد.

نتایج آزمایش مقاومت چسبندگی پول آف در شکل های ۷ و ۸ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۷، سنگدانه آهکی به دلیل مقدار زیاد CaO و خاصیت آبگریزی، چسبندگی بهتری با قیرها ایجاد کرد. از سوی دیگر، خواص آبدوستی و مقدار زیاد SiO₂ سنگدانه‌های گرانیتی، چسبندگی سنگدانه-قیر و در نتیجه مقاومت چسبندگی را کاهش داد. قیر PG 58-22 سازگاری بیشتری با هر دو نوع سنگدانه داشت. بنابراین، مقاومت



شکل ۷. مقاومت چسبندگی پول آف برای سنگدانه‌های آهکی



شکل ۸. مقاومت چسبندگی پول آف برای سنگدانه‌های گرانیتی

از بین بردن اثرات منفی پیرشدگی سبب بهبود مقاومت نمونه‌های اصلاح‌شده نسبت به قیر پایه در برابر خرابی رطوبتی گردید. گروه آمین افزودنی و تیفیکس با سطح سنگدانه و هیدروکربن‌های آبگریز واکنش می‌دهند. بنابراین، زنجیره‌های هیدروکربنی به عنوان پل بین سنگدانه‌های آبدوست و قیر آبگریز عمل می‌کنند تا پیوندهای قوی بین آنها ایجاد شود. نتایج بررسی تأثیر پیرشدگی بر مقاومت چسبندگی نمونه‌های اصلاح‌شده با استفاده از آزمون t در جداول ۶ و ۷ نشان شده است. مقادیر p -value در تمامی ترکیبات کمتر از ۰/۰۵ می‌باشد که بیانگر آن است که بین میانگین‌ها تفاوت معناداری وجود دارد. بنابراین، پیرشدگی تأثیر چشمگیری بر مقاومت چسبندگی نمونه‌های مختلف دارد.

در تمام نمونه‌ها، پیرشدگی سبب کاهش قابل توجه مقاومت چسبندگی گردید. این کاهش در حالت پیرشدگی بلندمدت بیشتر از نمونه‌های پیرشده کوتاه‌مدت بود. این موضوع نشان می‌دهد که باید توجه بیشتری به چسبندگی قیر-سنگدانه در حالت پیرشده، بخصوص در نوع بلندمدت آن شود. کاهش مقاومت چسبندگی می‌تواند به علت از بین رفتن حالت سیال قیر و سخت و شکننده شدن آن در اثر تبخیر روغن‌های قیر باشد. نمونه‌های حاوی قیر PG 58-22 و سنگدانه‌های آهکی بیشترین میزان کاهش مقاومت را در اثر پیرشدگی تجربه نمودند. در نمونه‌های اصلاح‌شده، مقاومت چسبندگی قیر و سنگدانه در حالات پایه و پیرشده نسبت به نمونه‌های فاقد افزودنی افزایش یافت. افزودنی و تیفیکس علاوه بر

جدول ۶. نتایج آزمون t برای بررسی تأثیر پیرشدگی بر مقاومت چسبندگی نمونه‌های حاوی قیر PG64-16 اصلاح‌شده

| قیر PG64-16 اصلاح‌شده + سنگدانه آهکی | | | | | | |
|--------------------------------------|------|---------|--------|---|-------|------------------|
| Std. Dev. | Mean | P-Value | t | N | وضعیت | حالت بررسی |
| ۰/۰۱۷۳۲ | ۱/۷۴ | ۰/۰۰۱ | ۳۸/۱۰۵ | ۳ | خشک | پیرنشده با |
| ۰/۰۲۶۶۶ | ۱/۵۲ | | | ۳ | | پیرشده کوتاه‌مدت |

| | | | | | | |
|---------|------|-------|---------|---|-------|-----------------|
| ۰/۰۱۷۳۲ | ۱/۳۸ | ۰/۰۰۲ | ۲۴/۹۸۰ | ۳ | مرطوب | |
| ۰/۰۲۰۰۰ | ۰/۸۶ | | | ۳ | | |
| ۰/۰۱۷۳۲ | ۱/۷۴ | ۰/۰۰۰ | ۴۵/۰۰۰ | ۳ | خشک | پیر نشده با |
| ۰/۰۱۷۳۲ | ۱/۲۹ | | | ۳ | | |
| ۰/۰۱۷۳۲ | ۱/۳۸ | ۰/۰۰۰ | ۱۶۹/۷۴۱ | ۳ | مرطوب | پیر شده بلندمدت |
| ۰/۰۲۰۰۰ | ۰/۴۰ | | | ۳ | | |

قیلر PG64-16 اصلاح شده + سنگدانه گرانیقی

| | | | | | | |
|---------|------|-------|--------|---|-------|-------------------|
| ۰/۰۱۰۰۰ | ۱/۶۸ | ۰/۰۰۲ | ۲۴/۲۴۹ | ۳ | خشک | پیر نشده با |
| ۰/۰۰۰۰۰ | ۱/۵۴ | | | ۳ | | |
| ۰/۰۱۰۰۰ | ۱/۰۶ | ۰/۰۰۰ | ۵۷/۱۵۸ | ۳ | مرطوب | پیر شده کوتاه مدت |
| ۰/۰۱۰۰۰ | ۰/۷۳ | | | ۳ | | |
| ۰/۰۱۰۰۰ | ۱/۶۸ | ۰/۰۰۱ | ۴۱/۰۰۰ | ۳ | خشک | پیر نشده با |
| ۰/۰۱۰۰۰ | ۱/۲۷ | | | ۳ | | |
| ۰/۰۱۰۰۰ | ۱/۰۶ | ۰/۰۰۰ | ۵۰/۴۰۸ | ۳ | مرطوب | پیر شده بلندمدت |
| ۰/۰۲۰۰۰ | ۰/۲۹ | | | ۳ | | |

جدول ۷. نتایج آزمون t برای بررسی تأثیر پیرشدگی بر مقاومت چسبندگی نمونه‌های حاوی قیلر PG58-22 اصلاح شده

قیلر PG58-22 اصلاح شده + سنگدانه آهکی

| Std. Dev. | Mean | P-Value | t | N | وضعیت | حالت بررسی |
|-----------|------|---------|--------|---|-------|-------------------|
| ۰/۰۱۰۰۰ | ۱/۷۸ | ۰/۰۰۱ | ۳۸/۱۰۵ | ۳ | خشک | پیر نشده با |
| ۰/۰۱۷۳۲ | ۱/۵۶ | | | ۳ | | |
| ۰/۰۱۰۰۰ | ۱/۴ | ۰/۰۰۰ | ۵۲/۰۰۰ | ۳ | مرطوب | پیر شده کوتاه مدت |
| ۰/۰۱۰۰۰ | ۰/۸۸ | | | ۳ | | |
| ۰/۰۱۰۰۰ | ۱/۷۸ | ۰/۰۰۰ | ۴۶/۰۰۰ | ۳ | خشک | پیر نشده با |
| ۰/۰۱۰۰۰ | ۱/۳ | | | ۳ | | |
| ۰/۰۱۰۰۰ | ۱/۴ | ۰/۰۰۰ | ۸۵/۷۳۷ | ۳ | مرطوب | پیر شده بلندمدت |
| ۰/۰۱۷۳۲ | ۰/۴۴ | | | ۳ | | |

قیلر PG58-22 اصلاح شده + سنگدانه گرانیقی

| | | | | | | |
|---------|------|-------|---------|---|-------|-------------------|
| ۰/۰۱۷۳۲ | ۱/۷۱ | ۰/۰۰۲ | ۲۲/۲۴۹ | ۳ | خشک | پیر نشده با |
| ۰/۰۱۰۰۰ | ۱/۵۷ | | | ۳ | | |
| ۰/۰۱۰۰۰ | ۱/۰۷ | ۰/۰۰۰ | ۵۵/۴۲۶ | ۳ | مرطوب | پیر شده کوتاه مدت |
| ۰/۰۱۷۳۲ | ۰/۷۵ | | | ۳ | | |
| ۰/۰۷۱۳۲ | ۱/۷۱ | ۰/۰۰۴ | ۱۶/۲۹۲ | ۳ | خشک | پیر نشده با |
| ۰/۰۲۶۴۶ | ۱/۳۰ | | | ۳ | | |
| ۰/۰۱۰۰۰ | ۱/۰۷ | ۰/۰۰۰ | ۱۳۱/۶۳۶ | ۳ | مرطوب | پیر شده بلندمدت |
| ۰/۰۱۰۰۰ | ۰/۳۱ | | | ۳ | | |

۴. نتیجه‌گیری

افزایش مقاومت قیر می‌گردد. اما هنگامی که قیر به مدت بیشتری تحت پیرشدگی قرار می‌گیرد سخت شدن بیش از حد آن سبب تردشدگی و در نتیجه کاهش مقاومت می‌شود. استفاده از افزودنی و تفتیکس نه تنها سبب از بین رفتن اثرات منفی پیرشدگی بر مقاومت‌های پیوستگی و چسبندگی شد، بلکه مقاومت نمونه‌های اصلاح‌شده را نسبت به پایه در برابر خرابی رطوبتی بهبود بخشید. با مقایسه نتایج مربوط به سنگدانه‌های مختلف مشخص شد که مقاومت پیوستگی تابع نوع قیر می‌باشد و نوع سنگدانه تأثیر چندانی بر این پارامتر ندارد. اما مقاومت چسبندگی علاوه بر نوع قیر به نوع سنگدانه نیز وابسته است. از طرفی دیگر، سنگدانه‌های آهکی، در مقایسه با سنگدانه‌های گرانیتی، چسبندگی بیشتر و قوی‌تری با قیرها ایجاد کردند. علت این امر وجود کانی CaO در سنگدانه آهکی می‌باشد که منجر به خاصیت آبگریزی آن می‌شود.

در این مطالعه، به بررسی تأثیر پیرشدگی بر گسیختگی پیوستگی و چسبندگی نمونه حاوی افزودنی و تفتیکس پرداخته شده است. برای بررسی خرابی رطوبتی، مجموعه‌ای از آزمایش پول آف در شرایط خشک و مرطوب روی نمونه‌های پایه و اصلاح‌شده در حالت پیرنشده و پیرشده انجام شد. در نهایت، نتایج به‌دست آمده از این آزمایش‌ها در شرایط مختلف تحلیل و با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج این مطالعه نشان داد که در شرایط مرطوب، پیرشدگی کوتاه‌مدت منجر به افزایش مقاومت پیوستگی و پیرشدگی بلندمدت منجر به کاهش مقاومت پیوستگی شد. همچنین، پیرشدگی منجر به کاهش مقاومت چسبندگی و در نتیجه افزایش خرابی رطوبتی گردید. در اثر پیرشدگی، بخش‌های سبک و فرار قیر تبخیر و تبدیل به اجزای سنگین‌تر می‌شود که سبب

۵. مراجع

- AASHTO R28. 2009. "Standard practice for accelerated aging of asphalt binder using a pressurized aging vessel (PAV)". American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO T 240. 2013. "Standard practice for effect of heat and air on a moving film of asphalt binder (rolling thin-film oven test)". American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- AASHTO T361. 2016. "Standard method of test for determining asphalt binder bond strength by means of the binder bond strength (BBS) test". American Association of State Highway and Transportation Officials, pp. 1-14.
- Aguiar-Moya, J. P., Salazar-Delgado, J., Baldi-Sevilla, A., Leiva-Villacorta, F. and Loria-Salazar, L. 2015. "Effect of aging on adhesion properties of asphalt mixtures with the use of bitumen bond strength and surface energy measurement tests". *Transp. Res. Record*, 2505(1): 57-65.
- Aksoy, A., Şamlioglu, K., Tayfur, S. and Özen, H. 2005. "Effects of various additives on the moisture damage sensitivity of asphalt mixtures". *Constr. Build. Mater.*, 19(1): 11-18.
- Alamrew, A. S. and Mollenhauer, K. 2021. "Advantages of filler and surfactant additive to improve moisture sensitivity of hot mix asphalt mixtures". In: *IOP Conference Series: Mater. Sci. Eng.*, 1202(1): 012011.
- Ali, S. A., Ghabchi, R., Zaman, M., Rahman, M. A. and Rani, S. 2022. "Laboratory characterization of moisture-induced damage potential of asphalt mixes using conventional and unconventional performance-based tests". *Int. J. Pavement Res. Tech.*, 15(5): 1209-1226.
- Arabani, M. and Balooch Sirgani, P. 2021. "Evaluation of performance and moisture sensitivity of polymer-modified mixture containing glass aggregates". *Int. J. Pavement Res. Tech.*, 15: 1166-1179.
- Arabani, M. and Majd Rahimabadi, M. 2023. "Assessing the effect of short and long-term aging on moisture damage of hot mix asphalt using two different methods". *Int. J. Pavement Eng.*, 24(1). <https://doi.org/10.1080/10298436.2023.2168661>

- Arabani, M., Majd Rahimabadi, M. and Hamed, G. H. 2023. "Investigating the effects of NMH and DA additives and short-and long-term aging on moisture damage of hot mix asphalt using mechanical methods". *Int. J. Pavement Res. Tech.* <https://doi.org/10.1007/s42947-023-00295-x>
- Asif, S. A., Ahmed, N., Hayat, A., Hussan, S., Shabbir, F. and Mehmood, K. 2018. "Study of adhesion characteristics of different bitumen-aggregate combinations using bitumen bond strength test". *J. Chin. Inst. Eng.*, 41(5): 430-440.
- Esmaeili, N., Hamed, G. H. and Khodadadi, M. 2019. "Determination of the stripping process of asphalt mixtures and the effective mix design and SFE parameters on its different phases". *Constr. Build. Mater.*, 213: 167-181.
- Hamed, G. H. 2017. "The laboratory study of the effect of using liquid anti-stripping materials on reducing moisture damage of HMA". *AUT J. Civ. Eng.*, 1(1): 23-30.
- Imaninasab, R. and Joodaki, S. 2019. "Performance evaluation of polyamine anti-stripping additives". *Proc. Instit. Civ. Eng.-Constr. Mater.*, 172(3): 155-163.
- Jameel, M. S., Abubakar, H. M., Raza, A., Iqbal, S. and Khalid, R. A. 2022. "Effect of aging on adhesion and moisture damage of asphalt: A perspective of rolling bottle and bitumen bond strength test". *Int. J. Pavement Res. Tech.*, 15(1): 233-242.
- López-Montero, T., Crucho, J., Picado-Santos, L. and Miró, R. 2018. "Effect of nanomaterials on ageing and moisture damage using the indirect tensile strength test". *Constr. Build. Mater.*, 168: 31-40.
- Nataadmadja, A. D., Prahara, E., Setyandito, O. and Ananditha, R. W. 2019. "Evaluation of moisture susceptibility of hot mix asphalt". In: *AIP Conference Proceedings*, 2202(1).
- Nataadmadja, A. D., Prahara, E., Setyandito, O. and Ananditha, R. W. 2020. "Analysis of moisture susceptibility of hot mix asphalt with waterproofing additives". In: *IOP Conference Series: Mater. Sci. Eng.*, 849(1): 012058.
- Nikolaides, A. 2014. "Highway engineering: Pavements". *Materials and Control of Quality*, 1st ed., CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b17690>
- Xiao, R. and Huang, B. 2022. "Moisture damage mechanism and thermodynamic properties of hot-mix asphalt under aging conditions". *ACS Sustain. Chem. Eng.*, 10(45): 14865-14887.
- Zhang, R., Sias, J. E. and Dave, E. V. 2020. "Evaluation of the cracking and aging susceptibility of asphalt mixtures using viscoelastic properties and master curve parameters". *J. Traffic Transp. Eng. (English Ed.)*, 9(1): 106-119.